



과제구분	기관고유	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명		연구분야	수행기간	연구실	책임자
기후변화 대응 온실가스 저감 친환경 생산 기술 개발		농업환경	'20~'27	농업기술원 환경농업연구과	주옥정
우분퇴비 시용량에 따른 벼 생육 및 미질특성 구명		농업환경	'23~'24	농업기술원 환경농업연구과	소호섭
색인용어	우분퇴비, 토양, 수질, 벼, 미질				

ABSTRACT

Since the ocean dumping of livestock manure was banned in 2012, livestock manure has been recycled into compost and liquid fertilizer for use on farmland, promoting the integrated crop livestock farming. However, issues such as odor, groundwater contamination, and soil pollution due to excessive application have been raised. Therefore we analyzed the chemical properties of paddy soil, water quality, and rice quality characteristics under continuous use of cow manure compost from 2023 to 2024. After the experiment, soil organic matter in the paddy field increased in all treatments during the first year. Available phosphate content also increased in all treatments where cow manure compost was applied. The concentrations of total phosphorus (T-P), suspended solids (SS), and total organic carbon (TOC) in runoff water from paddy soil exceeded river water quality standards in treatments with double or higher application rates of cow manure compost used continuously. As the application rate of cow manure compost increased, plant height tended to increase, and leaf greenness became darker. During the rice maturation stage, the number of panicles per unit increased with higher cow manure compost rates, while the number of spikelets per panicle and grain filling percentage decreased. Rice lodging and pest/disease occurred in the treatments with double or more continuous application of cow manure compost. Additionally, although rice yield increased with higher cow manure compost application, the percentage of whiteness decreased, while the number of damaged grains and protein content increased.

Therefore, to promote the integrated crop livestock farming and ensure high-quality rice production in the Gyeonggi region, it is considered necessary to apply cow manure compost at an appropriate rate that protects both soil and water quality environments.

Key words: Cow manure compost, Soil, Water quality, Rice, Rice quality

1. 연구목표

2019년 우리나라 가축분뇨 발생량은 5,184만 톤으로 돼지분뇨 40.0%, 한육우 30.8%, 닭 15.3% 순이며, 가축분뇨 발생량의 75.5%는 퇴·액비화되고, 5.7%는 정화방류 처리되고 있다(남재작, 2020). 한편 2012년부터 가축분뇨의 해양투기가 금지됨에 따라 가축분뇨를 퇴·액비화 등 자원화하여 농지에 활용하는 경축순환농업을 추진하고 있지만 가축분뇨가 적절히 처리되지 못할 경우 토양에 질소, 인 축적을 초래하며, 농업의 비점오염으로 작용하여 지표수 및 지하수의 오염의 원인이 되기도 하고 악취발생 등의 위생학적인 문제를 유발시키기도 한다 (농촌진흥청, 2002; Stumborg et al., 2005; 박진도, 2019). 하지만 볏짚퇴비 등 적정량의 유기물 시용은 단기적인 효과는 미미한 반면 장기적으로는 토양비옥도 향상과 작물생육 및 질소흡수에 효과적으로 수량 증대에 기여한다 (Takahashi et al., 2003; 국립식량과학원, 2016). 본 연구에서는 경축순환농업 추진시 우분퇴비 시용량 및 연용에 따른 벼 재배지 토양과 논 유출수의 화학성 및 미질 특성에 대한 과학적인 효과를 구명하고자 수행하였다

2. 재료 및 방법

본 시험은 화성시 소재 경기도농업기술원에서 2023년부터 2024년까지 2년간 수행하였다. 시험품종은 참드림으로 매년 5월 30일에 30×14cm, 주당본수 3~4본으로 기계이앙하였다. 시험에 사용한 우분퇴비는 부숙완료된 평택소재 한우농가 퇴비를 사용하였다(표 1).

표 1 우분퇴비의 화학적 특성

pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	T-N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	부숙도 (%)	함수율 (%)	염분 (%)
9.4	57.0	1.3	1.7	2.2	2.0	0.8	0.7	78	49	1.3

시비량은 작물별 시비처방 기준(국립농업과학원, 2010b)에 따라 벼 표준시비량(N-P₂O₅-K₂O = 9.0-4.5-5.7kg 10a⁻¹)을 화학비료로 시비한 처리구에 우분퇴비를 1배(1.2톤 10a⁻¹) 연용, 2배(2.4톤 10a⁻¹) 연용처리와, 1년차에는 4배(4.8톤 10a⁻¹) 살포하고 2년차(2024년)에는 2배(2.4톤 10a⁻¹) 살포한 처리구와 3요소 토양검정으로 시비한 대조구로 비교하였다. 토양특성은 벼 이앙전과 수확기에 표토 0~20cm 깊이의 토양을 채취하여 음지에서 자연 건조시킨 후 2mm 체를 통과시켜 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법(국립농업과학원, 2010a)에 따라 분석을 실시하였다. 또한 농업용수 분석은 시험논에서 유출되는 지표수와 지하수를 채수하여 4℃ 이하의 온도로 보관하면서 분석시료로 사용하였다. 논토양속으로 유출되는 지하수는 토양용액채취기(Macro Rhizon sampler, C&Y사)를 30cm와 60cm 깊이로 설치하여 60ml 주사기로 연결한 다음 이앙후 30일 간격으로 채수하여 질산태질소(NO₃-N), 암모니아태질소(NH₄-N)와 인산(PO₄-P) 함량을 측정하였다. 수질은 환경부 수질오염공정시험방법(환경부, 2007)과 농업환경 실험분석법(경기도농업기술원, 2018)에 의거하여 분석하였다. 벼의 생육 및 쌀 수량조사는 농촌진흥청 농사시험연구 조사기준(농촌진흥청, 2013)에 따라 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 벼 재배기간중 기상

2023년 5월부터 2024년 10월까지 벼 생육기간의 기상은 표 2와 같다. 2023년과 2024년의 평균온도는 평년대비 각각 2.2℃, 3.1℃, 최저온도는 각각 1.9℃, 3.5℃ 나, 최고온도는 각각 2.7℃, 2.3℃ 높았다. 2023년 강수량은 평년대비 30.0%(290.1mm) 감소하였고, '24년은 1,037.9mm로 평년과 비슷한 수준이었다. 기상청(2020)은 해수면 온도도 지속적으로 상승하고 있고 한반도 폭염 발생빈도, 강도, 지속성은 1970년대 이후 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 열대야의 발생빈도는 뚜렷하게 증가하고 있으며 최근 10년간 월평균 관점에서 이상고온 경향이 뚜렷하다고 보고하였다.

표 2. 벼 재배기간중 기상

기간	연도	평균기온(℃)	최저기온(℃)	최고기온(℃)	강수량(mm)
5월	2023	20.9	16.1	27.0	14.0
	2024	19.7	15.3	24.4	11.1
	평년	19.1	14.3	24.5	23.6
	2023	22.4	17.2	28.5	1.6
	2024	21.1	15.5	27.2	4.7
	평년	20.8	15.9	26.5	23.8
	2023	23.5	17.9	30.3	43.2
	2024	24.2	18.3	30.5	1.7
	평년	21.8	17.6	26.6	48.4
6월	2023	25.7	21.4	31.1	73.4
	2024	24.4	19.9	28.9	81.3
	평년	22.7	19.2	27.0	57.8
	2023	26.2	22.0	31.4	69.3
	2024	25.9	23.8	28.4	106.8
	평년	23.8	20.8	27.7	79.3
	2023	25.5	22.9	29.0	75.5
	2024	27.2	24.5	30.8	234.6
	평년	24.2	21.1	28.1	174.1
7월	2023	28.4	24.2	34.3	134.1
	2024	29.1	27.1	31.8	52.5
	평년	25.3	22.3	29.4	146.7
	2023	29.0	24.9	34.2	131.0
	2024	30.1	27.3	33.8	13.6
	평년	26.4	22.9	31.1	71.4
	2023	28.4	24.2	34.1	0.4
	2024	30.3	26.9	34.7	13.6
	평년	25.3	22.0	29.6	81.3

표 2. 벼 재배기간중 기상현황(계속)

기간		연도	평균기온(℃)	최저기온(℃)	최고기온(℃)	강수량(mm)
8월	하순	2023	25.4	22.4	29.9	44.6
		2024	27.9	24.7	31.9	33.3
		평년	23.9	20.2	28.5	79.9
	상순	2023	26.2	21.0	32.8	0.3
		2024	26.2	22.8	30.3	2.1
		평년	22.5	18.2	27.9	48.7
9월	중순	2023	23.7	20.3	28.0	22.0
		2024	27.8	24.7	31.2	112.1
		평년	21.0	16.3	26.7	78.2
	하순	2023	21.0	16.8	26.5	34.3
		2024	22.2	18.0	27.2	52.0
		평년	18.6	13.4	25.0	30.7
10월	상순	2023	16.7	11.1	23.6	9.1
		2024	17.9	12.5	23.5	13.1
		평년	16.2	10.5	23.1	17.7
	중순	2023	15.1	9.1	22.1	25.1
		2024	18.7	14.4	23.5	305.4
		평년	14.1	8.1	21.1	6.4
전체 평균		2023	23.9	19.4	29.5	677.9
		2024	24.8	21.0	29.2	1037.9
		평년	21.7	17.5	26.9	968.0

나. 시험전후 논 토양 및 수질 화학성

2023년과 2024년 시험전과 시험후의 논토양 화학성을 분석한 결과는 표 3과 같다. 우분퇴비 연용에 따른 pH는 6.2~7.3으로 적정범위인 5.5~6.5보다 다소 높았다. 시험후 논토양의 유기물은 시험전에 비해 1년차(2023년)는 모든 처리에서 증가하였으나 2년차(2024년)에서는 증가하지 않았고, 논토양에 적합한 범위(20~30g kg⁻¹)에 있었다. 우분퇴비 1배를 2년간 연용처리한 시험구의 2024년 유효인산 함량은 시험전 58mg kg⁻¹에서 시험후 90mg kg⁻¹, 우분퇴비 2배 연용처리구는 83mg kg⁻¹에서 133mg kg⁻¹, 1년차는 우분퇴비 4배에 2년차에는 우분퇴비 2배 처리한 시험구는 81mg kg⁻¹에서 120mg kg⁻¹으로 증가하였다. 우분퇴비 2배 이상 연용처리구의 시험후 교환성 칼륨함량은 0.53~0.77cmol_c kg⁻¹로 표준시비(0.37~0.46cmol_c kg⁻¹) 보다 높았다. 벧짚퇴비 연용(곽 등, 1990)과 돈분툽밥퇴비 연용(양 등, 2007)으로 유효인산 함량이 크게 증가한 바와 같이 우분퇴비도 1배 이상 연용시비할 경우 토양 유효인산함량이 증가하는 것으로 나타났다.

표 3. 시험전·후 농토양 화학성

처리 내용	시기	연도	pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	Ex.Cations (cmolc kg ⁻¹)		
								K	Ca	Mg
표준 시비	시험전	2023	6.7	31	87	228	3.40	0.58	8.8	1.8
		2024	7.2	29	86	174	1.69	0.50	7.1	1.6
	시험후	2023	6.6	32	77	180	2.30	0.46	8.4	1.7
		2024	6.6	24	67	237	3.57	0.37	7.2	1.4
우분1배 연용	시험전	2023	6.6	29	67	246	2.89	0.48	8.5	1.7
		2024	7.3	25	58	157	1.48	0.48	7.2	1.6
	시험후	2023	6.4	30	69	187	2.88	0.50	7.8	1.6
		2024	6.5	24	90	196	3.66	0.55	6.9	1.4
우분2배 연용	시험전	2023	6.3	30	74	180	3.68	0.55	7.9	1.6
		2024	7.0	31	83	159	0.89	0.70	6.9	1.7
	시험후	2023	6.5	33	73	175	1.09	0.53	7.6	1.6
		2024	6.6	28	133	195	2.21	0.77	7.2	1.5
우분4배 +2배	시험전	2023	6.2	25	45	171	2.54	0.40	7.3	1.4
		2024	7.0	27	81	171	0.75	0.74	6.6	1.5
	시험후	2023	6.6	32	97	186	1.46	0.59	7.5	1.5
		2024	6.5	25	120	182	2.57	0.69	6.4	1.3
적정범위			5.5~6.5	20~30	80~120	>157		0.2~0.3	5.0~6.0	1.5~2.0

다. 논물 유출수의 화학성

논에서 우분퇴비를 살포한 후 농토양에서 유출되는 지표수의 화학성을 분석한 결과는 표 4와 같다. 2024년 벼 재배기간의 pH는 7.0~8.1로 하천 환경정책기본법 시행령 환경기준 농업용수의 4등급인 약간 나쁨을 적용할 경우 하천수의 기준(pH 6.0~8.5)을 충족하였다. 총질소(T-N)는 0.5~3.1mg L⁻¹이었으며, 수질악화의 원인인 부영양화를 일으키는 총인(T-P)은 표준시비와 우분퇴비 1배 연용처리구는 하천수 기준(0.3mg L⁻¹ 미만)을 충족하였으나 이양후 90일 이후의 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구는 0.3~0.6mg L⁻¹로 하천수 기준을 초과하였다. 용존산소(DO)는 이양후 90일 이후의 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 0.34~1.35mg L⁻¹와 0.3~1.67mg L⁻¹로 하천수 기준(2.0mg L⁻¹ 초과)을 충족하지 못했다. 생화학적 산소요구량(BOD)은 0.6~4.3mg L⁻¹로 하천수 기준(8mg L⁻¹ 미만)을 충족하였으나, 부유물질(SS)은 이양후 120일 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 227.7mg L⁻¹와 108.9mg L⁻¹ 검출되어 하천수 기준(100mg L⁻¹ 미만)을 초과하였고 총유기탄소(TOC)는 이양후 90일 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 9.2mg L⁻¹ 검출되어 하천수 기준(6mg L⁻¹ 초과)을 초과하였다. 따라서 우분퇴비 2배 이상 연용처리시 하천 환경정책기본법 시행령 환경기준 농업용수의 4등급인 약간 나쁨을 적용할 경우 총인(T-P), 용존산소(DO), 부유물질(SS), 총유기탄소(TOC)가 하천수의 기준을 초과하였다.

표 4. 논물 지표수 화학성 분석(2024년)

구분	처리내용	pH (1:5)	PO ₄ -P	NO ₃ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	T-N (mg L ⁻¹)	T-P	DO	BOD	SS	TOC
이앙전	표준시비	7.8	0.20	0.06	82	42.6	1.8	0.1	5.83	0.9	0.20	14.5
	우분1배 연용	7.9	0.12	0.03	112	42.3	2.2	0.1	4.06	0.8	0.16	28.0
	우분2배 연용	7.8	0.17	0.06	131	28.2	3.1	0.2	4.08	2.3	0.15	40.0
	우분4배+2배	8.1	0.18	0.03	103	30.5	2.7	0.2	7.11	4.2	0.04	35.0
이앙후 30일	표준시비	7.8	0.38	0.10	88	11.3	1.7	0.1	2.08	2.8	59.5	14.6
	우분1배 연용	7.9	0.13	0.05	56	11.3	1.7	0.2	2.59	2.7	79.0	21.6
	우분2배 연용	7.7	0.17	0.03	74	11.5	1.6	0.2	2.88	2.9	71.8	24.2
	우분4배+2배	7.9	0.27	0.06	58	6.0	1.8	0.2	3.16	2.9	75.4	23.6
이앙후 60일	표준시비	7.8	0.04	0.18	12	1.5	0.5	0.1	3.44	1.2	3.2	3.0
	우분1배 연용	7.9	0.01	0.08	8	4.6	0.6	0.0	3.74	0.6	2.0	3.5
	우분2배 연용	7.6	0.04	0.04	15	6.5	0.8	0.1	3.08	1.1	16.6	5.4
	우분4배+2배	7.5	0.08	0.46	9	2.3	0.9	0.2	1.42	4.3	90.5	3.1
이앙후 90일	표준시비	7.0	0.11	0.01	28	6.2	0.8	0.1	1.24	2.9	31.5	5.3
	우분1배 연용	7.9	0.03	0.20	7	1.3	1.1	0.1	1.68	4.2	15.4	5.9
	우분2배 연용	7.1	0.20	0.01	47	5.4	1.2	0.3	0.34	2.5	32.1	9.2
	우분4배+2배	7.0	0.17	0.01	43	5.4	1.4	0.3	0.30	1.3	54.5	9.2
이앙후 120일	표준시비	7.3	0.13	0.13	10	3.2	0.9	0.1	1.95	2.0	5.1	3.1
	우분1배 연용	8.0	0.02	0.91	6	5.3	1.1	0.0	1.80	0.8	6.3	4.0
	우분2배 연용	7.1	0.47	0.37	6	29.3	1.3	0.6	1.35	1.5	227.7	2.1
	우분4배+2배	7.0	0.28	0.65	4	10.2	1.2	0.3	1.67	2.4	108.9	2.1
농업용수	하천수	60-85	-	-	-	-	<0.3	>2.0	<8	<100	<6	

※ 하천 환경정책기본법 시행령 환경기준 농업용수 약간 나쁨(Ⅳ) 적용

라. 논 깊이별 토양수분의 질소와 인산함량(2024년)

논에서 우분퇴비를 살포한 후 논토양 지하수로 유출되는 질산태질소 함량을 분석한 결과는 표 5와 같다.

표 5. 논 깊이별 토양수분내 질산태질소 함량(mg L⁻¹)

구분	처리내용	표층	깊이		구분	처리내용	표층	깊이	
			30cm	60cm				30cm	60cm
이앙후 7일	표준시비	0.065	0.024	0.041	이앙후 35일	표준시비	0.015	0.011	0.008
	우분1배 연용	0.060	0.080	0.030		우분1배 연용	0.014	0.005	0.007
	우분2배 연용	0.071	0.030	0.236		우분2배 연용	0.003	0.004	0.003
	우분4배+2배	0.041	0.056	0.358		우분4배+2배	0.004	0.007	0.003
이앙후 14일	표준시비	0.087	0.025	0.029	이앙후 60일	표준시비	0.018	0.011	0.011
	우분1배 연용	0.035	0.031	0.047		우분1배 연용	0.015	0.010	0.008
	우분2배 연용	0.056	0.031	0.240		우분2배 연용	0.052	0.005	0.008
	우분4배+2배	0.048	0.032	0.232		우분4배+2배	0.108	0.008	0.009
이앙후 21일	표준시비	0.031	0.035	0.030	이앙후 90일	표준시비	0.012	0.005	0.005
	우분1배 연용	0.038	0.038	0.034		우분1배 연용	0.000	0.006	0.006
	우분2배 연용	0.033	0.047	0.089		우분2배 연용	0.000	0.005	0.006
	우분4배+2배	0.028	0.043	0.083		우분4배+2배	0.000	0.003	0.006
이앙후 28일	표준시비	0.059	0.017	0.017	이앙후 120일	표준시비	0.033	0.023	0.018
	우분1배 연용	0.050	0.014	0.011		우분1배 연용	0.018	0.021	0.025
	우분2배 연용	0.063	0.007	0.011		우분2배 연용	0.057	0.027	0.035
	우분4배+2배	0.033	0.014	0.004		우분4배+2배	0.055	0.021	0.022

※ 농업용수(지하수) 기준: 20mg L⁻¹이하

이양후 7일부터 120일까지 표층과 30cm 깊이 토양의 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 함량은 각각 $0\sim 0.108\text{mg L}^{-1}$, $0.005\sim 0.08\text{mg L}^{-1}$ 로 나타났으나, 이양후 7일부터 14일까지 논 60cm 깊이 토양의 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 함량은 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 $0.236\sim 0.240\text{mg L}^{-1}$, $0.232\sim 0.358\text{mg L}^{-1}$ 로 가장 높았으나 지하수 범 시행규칙 및 지하수 수질 보전규칙의 지하수 기준(20mg L^{-1} 이하) 이하였다.

논에서 우분퇴비를 살포한 후 논토양 지하수로 유출되는 암모니아태질소($\text{NH}_4\text{-N}$) 함량을 분석한 결과는 표 6과 같다. 표층은 이양후 120일까지, 30cm 깊이는 토양에서는 이양후 35일까지, 60cm 깊이는 토양에서는 이양후 21일까지 토양수분내 암모니아태질소($\text{NH}_4\text{-N}$)가 0.1mg L^{-1} 이상 검출되었다.

표 6. 논 깊이별 토양수분내 암모니아태질소 함량 (mg L^{-1})

구분	처리내용	표층	깊이		구분	처리내용	표층	깊이	
			30cm	60cm				30cm	60cm
이양후 7일	표준시비	2.718	2.604	1.004	이양후 35일	표준시비	0.108	0.198	0.021
	우분1배 연용	5.524	1.148	2.238		우분1배 연용	0.089	0.562	0.038
	우분2배 연용	2.055	2.922	6.175		우분2배 연용	5.853	0.634	0.007
	우분4배+2배	3.095	2.663	5.849		우분4배+2배	2.571	0.701	0.023
이양후 14일	표준시비	3.649	1.478	0.434	이양후 60일	표준시비	0.158	0.035	0.009
	우분1배 연용	3.055	0.271	0.409		우분1배 연용	0.037	0.028	0.000
	우분2배 연용	1.696	1.590	4.047		우분2배 연용	0.073	0.002	0.002
	우분4배+2배	1.318	1.427	1.422		우분4배+2배	0.092	0.064	0.002
이양후 21일	표준시비	2.324	0.846	0.196	이양후 90일	표준시비	0.054	0.003	0.000
	우분1배 연용	4.432	0.331	0.169		우분1배 연용	0.002	0.000	0.006
	우분2배 연용	8.680	1.296	0.225		우분2배 연용	0.007	0.006	0.000
	우분4배+2배	2.420	1.043	0.046		우분4배+2배	0.000	0.006	0.004
이양후 28일	표준시비	0.640	0.521	0.067	이양후 120일	표준시비	0.145	0.019	0.020
	우분1배 연용	0.330	0.510	0.090		우분1배 연용	0.321	0.020	0.021
	우분2배 연용	1.345	0.923	0.028		우분2배 연용	0.393	0.020	0.015
	우분4배+2배	0.386	0.559	0.015		우분4배+2배	0.567	0.016	0.020

논에서 우분퇴비를 살포한 후 논토양 지하수로 유출되는 인산($\text{PO}_4\text{-P}$) 함량을 분석한 결과는 표 7과 같다. 이양후 7일부터 120일까지 30cm와 60cm 깊이의 토양의 인산($\text{PO}_4\text{-P}$) 함량은 각각 $0.001\sim 0.02\text{mg L}^{-1}$, $0.001\sim 0.041\text{mg L}^{-1}$ 로 미량 검출되었으나, 표층은 이양후 120일 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 0.263mg L^{-1} , 0.187mg L^{-1} 로 표준시비(0.042mg L^{-1})와 우분퇴비 1배 연용처리구(0.095mg L^{-1}) 보다 약 2~3배 이상 검출되었다.

표 7. 논 깊이별 토양수분내 인산 함량

(mg L⁻¹)

구분	처리내용	표층	깊이		조사시기	처리내용	표층	깊이	
			30cm	60cm				30cm	60cm
이앙후 7일	표준시비	0.286	0.004	0.007	이앙후 35일	표준시비	0.042	0.006	0.003
	우분1배 연용	0.131	0.020	0.003		우분1배 연용	0.052	0.003	0.003
	우분2배 연용	0.121	0.003	0.010		우분2배 연용	0.194	0.006	0.008
	우분4배+2배	0.201	0.009	0.008		우분4배+2배	0.108	0.004	0.005
이앙후 14일	표준시비	0.194	0.005	0.004	이앙후 60일	표준시비	0.051	0.004	0.002
	우분1배 연용	0.023	0.004	0.004		우분1배 연용	0.022	0.003	0.002
	우분2배 연용	0.264	0.010	0.041		우분2배 연용	0.083	0.003	0.004
	우분4배+2배	0.161	0.006	0.018		우분4배+2배	0.074	0.002	0.003
이앙후 21일	표준시비	0.196	0.006	0.003	이앙후 90일	표준시비	0.082	0.002	0.002
	우분1배 연용	0.061	0.005	0.005		우분1배 연용	0.064	0.001	0.002
	우분2배 연용	0.058	0.008	0.013		우분2배 연용	0.045	0.002	0.004
	우분4배+2배	0.044	0.006	0.009		우분4배+2배	0.098	0.003	0.001
이앙후 28일	표준시비	0.183	0.005	0.005	이앙후 120일	표준시비	0.042	0.005	0.004
	우분1배 연용	0.154	0.004	0.003		우분1배 연용	0.095	0.006	0.004
	우분2배 연용	0.447	0.004	0.012		우분2배 연용	0.263	0.007	0.012
	우분4배+2배	0.275	0.005	0.003		우분4배+2배	0.187	0.007	0.005

마. 엽색도 등 벼 생육상황

우분퇴비 사용량이 벼 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해 벼 이앙 후 30, 60, 90 일에 초장, 분얼수와 엽색도(SPAD)를 조사하였다(표 8). 우분퇴비 사용량이 많을수록 초장은 길어지고 분얼수는 많아지며 엽색도(SPAD)가 증가하는 경향이였다.

표 8. 벼 생육상황

구분	처리내용	초장(cm)		분얼수(개/주)		엽색도(SPAD)	
		2023년	2024년	2023년	2024년	2023년	2024년
이앙후 30일	표준시비	33 ab	42 d	16 ns	17 ns	33.9 ns	36.5 ns
	우분1배 연용	34 a	43 c	17	17	35.6	37.2
	우분2배 연용	32 ab	45 a	19	18	37.0	38.7
	우분4배+2배	32 b	44 b	19	18	37.3	38.0
이앙후 60일	표준시비	82 ns	78 b	16 ns	17 ns	32.9 ab	33.6 b
	우분1배 연용	88	82 ab	17	17	35.2 a	33.8 b
	우분2배 연용	86	85 a	19	19	34.2 ab	35.7 a
	우분4배+2배	87	82 ab	19	19	32.8 b	35.5 a
이앙후 90일	표준시비	103 b	96 b	18 ns	18 b	32.8 ns	34.1 b
	우분1배 연용	108 b	98 b	18	19 ab	33.1	34.3 b
	우분2배 연용	108 b	102 a	19	21 a	33.1	35.6 a
	우분4배+2배	118 a	102 a	19	21 a	34.0	35.3 a

※ DMRT 5% level

바. 벼 성숙기 생육 및 병해충 발생

벼 성숙기 생육과 병해충 발생에 따른 피해율 및 도복을 조사한 결과는 표 9와 같다. 벼 성숙기 생육은 우분퇴비 시용량이 많을수록 간장은 길어지고, 수수는 증가하였고, 잎집무늬마름병과 흑명나방은 우분퇴비 4배 처리구(2023년)에서 각각 13%, 15% 발생했으나 2024년에는 모든 처리구에서 거의 발생하지 않았다. 또한 도복은 우분퇴비 4배 처리구(2023년)에서 5, 2024년에는 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 3과 5정도 발생했다. 도복은 쌀 수량과 품질, 품종, 시비량, 시비시기, 분시방법, 재식밀도, 물관리, 병해충에 의해 발생(임 등, 1992; 박 등, 2002; 정 등, 2006)할 뿐 아니라, 우분퇴비를 4배 사용하거나 2배 이상 2년 연용처리시에도 벼 도복이 발생하였다.

표 9. 벼 성숙기 생육 및 병해충 발생정도

처리내용	간장(cm)		수장(cm)		수수(개)		피해율 ¹ (%)				도복 ² (1~9)	
							잎집무늬마름병		흑명나방			
	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24
표준시비	78.1 b	73.7b	17.5ns	17.4a	14 c	17b	1	1	1	1	1	1
우분1배 연용	84.4 b	73.7b	17.9	16.7b	19 b	19ab	3	1	3	1	1	1
우분2배 연용	81.7 b	76.0a	18.4	17.3a	19 b	20a	3	1	3	1	1	3
우분4배+2배	92.3 a	76.7a	18.2	17.0ab	21 a	20a	13	1	15	1	5	5

※ DMRT 5% level, ¹요방제수준: 잎집무늬마름병 20%, 흑명나방 7%

²도복: 이삭줄기경사 15%(1), 16~30%(3), 31~45%(5)

사. 수량 특성

우분퇴비 시용량에 따른 쌀수량 및 완전미수량을 조사한 결과는 표 10과 같다. 2024년은 우분퇴비 시용량이 많을수록 수당립수와 등숙비율은 감소하였다. 쌀수량은 우분퇴비 2배 연용구가 2023년은 6.03t ha⁻¹, 2024년은 5.48t ha⁻¹으로 가장 높았다. 완전미수량도 쌀수량과 마찬가지로 우분퇴비 2배 연용구에서 2023년은 5.47t ha⁻¹, 2024년은 4.27t ha⁻¹으로 가장 높았다. 한편 우분퇴비 4배+2배 처리구의 2023년 완전미비율은 89.5%로 표준시비(92.3%) 보다 낮았다.

표 10. 벼 수량 특성

처리내용	수당립수 (립)		등숙비율 (%)		현미 천립중 (g)		쌀수량 (t ha ⁻¹)		완전미 비율 (%)		완전미 수량 (t ha ⁻¹)	
	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24
표준시비	122ab	95a	87.7a	88.5a	22.8 ns	21.7 ns	5.07 b	4.97 d	92.3 a	75.5 ns	4.70 b	3.75 c
우분1배 연용	103c	80b	85.6ab	88.5a	22.7	22.2	5.83 a	5.26 c	91.9 a	75.2	5.37 a	3.95 b
우분2배 연용	117b	77c	86.2ab	82.1b	22.8	22.1	6.03 a	5.48 a	91.3 ab	78.0	5.47 a	4.27 a
우분4배+2배	126a	73c	82.5b	78.5c	21.9	21.5	5.97 a	5.34 b	89.5 b	76.2	5.37 a	4.07 b

※ DMRT 5% level

아. 백미 품질특성

우분퇴비 시용량에 따른 백미 품질특성을 조사한 결과는 표 11과 같다. 백미 품위 중 2023년 완전립은 우분퇴비 시용량이 많을수록 감소하였고, 분상질립은 우분퇴비 시용량과 통계적 유의성이 없으나 우분퇴비 시용량이 많을수록 증가하는 경향이었으며 2024년 피해립은 우분퇴비 시용량이 많을수록 증가하였다. 백도는 우분퇴비 시용량이 많을수록 감소하였으나 백미 단백질 함량은 우분퇴비 4배 처리(2023년)시 5.5%와 우분퇴비 2배 이용 연용처리구(2024년)에서 5.3% 이상으로 우분퇴비 시용량이 많을수록 증가하였다.

표 11. 백미 품질특성

처리내용	완전립 (%)		싸라기 (%)		분상질립 (%)		피해립 (%)		백도		백미단백질 (%)	
	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24	'23	'24
표준시비	92.8a	74.0b	6.5b	22.4a	0.1ns	0.7ns	0.6ns	4.0b	45.6a	39.8ns	4.8b	4.7b
우분1배 연용	91.9a	74.8b	7.3ab	19.8a	0.1	0.8	0.6	4.2b	44.4ab	39.7	4.8b	4.9b
우분2배 연용	91.3ab	79.2a	8.0ab	14.8b	0.1	0.7	0.6	5.2ab	44.6ab	38.1	4.8b	5.4a
우분4배+2배	89.5b	77.0ab	9.5a	15.1b	0.2	0.9	0.8	7.1a	43.2b	37.5	5.5a	5.3a

※ DMRT 5% level

Miao 등(2010)은 화학비료를 과용할 경우 영양불균형이 심해지고 환경오염을 유발하지만 적정량의 화학비료와 퇴비를 시용할 경우 환경오염을 줄이고 지속농업이 가능하다고 하였다. 다만 유기물시용시 우분퇴비를 2배 이상 연용할 경우 유효인산과 교환성 칼륨이온이 지나치게 과다해지며 수질악화의 원인인 부영양화를 일으키는 총인(T-P), 용존산소(DO), 부유물질(SS) 및 총유기탄소(TOC)가 환경기준을 초과할 뿐 아니라 도복과 병해충이 발생하고 단백질 함량이 많아져 쌀 품질이 낮아지므로 우분퇴비를 적정량 살포해야 할 것으로 생각된다. 따라서 경축순환농업 추진시 고품질 쌀 안정생산을 위해서는 화학비료와 유기물의 적절한 시비가 중요하므로 고품질 벼 최적생산에 알맞은 시비처방과 토양 및 수질관리가 필요하다.

4. 적요

2023년부터 2024년까지 우분퇴비 시용량 및 연용에 의한 벼 재배지 토양이화학성, 수질환경 및 미질특성 등 연구결과는 다음과 같다.

- 가. 2023년과 2024년의 평균온도는 평년대비 각각 1.3℃, 2.3℃, 최저온도는 각각 2.9℃, 4.5℃ 높았으나, 최고온도는 각각 1.7℃, 1.2℃ 낮았다. 강수량은 평년대비 2023년에는 8.8%(85mm) 증가하였고, 2024년은 975.7mm로 평년과 비슷하였다.
- 나. 시험후 논토양의 유기물 함량은 시험전에 비해 2023년은 우분퇴비를 시용한 모든

- 처리에서 증가하였으며, 우분퇴비를 2년간 연용처리한 모든 시험구의 유효인산 함량도 마찬가지로 시험전에 비해 증가하였다.
- 다. 우분퇴비 2배 이상 연용처리시 수질악화의 원인인 부영양화를 일으키는 총인(T-P), 용존산소(DO), 부유물질(SS) 및 총유기탄소(TOC)가 하천 환경정책기본법 시행령 환경기준 농업용수의 4등급인 약간 나쁨을 적용할 경우 하천수의 환경기준을 초과하였다.
- 라. 논토양 지하수로 유출되는 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 함량은 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 $0.236\sim 0.240\text{mg L}^{-1}$, $0.232\sim 0.358\text{mg L}^{-1}$ 로 가장 높았으나 지하수법 시행규칙 및 지하수 수질 보전규칙의 지하수 기준(20mg L^{-1} 이하)을 준수하였다.
- 마. 암모니아태질소($\text{NH}_4\text{-N}$) 함량은 모든 처리구에서 표층은 이양후 120일까지, 30cm 깊이 토양에서는 이양후 35일까지, 60cm 깊이 토양에서는 이양후 21일까지 0.1mg L^{-1} 이상 검출되었다.
- 바. 인산($\text{PO}_4\text{-P}$) 함량은 이양후 120일까지 30cm와 60cm 깊이 토양에서 각각 $0.001\sim 0.02\text{mg L}^{-1}$, $0.001\sim 0.041\text{mg L}^{-1}$ 로 매우 미량 검출되었으나, 표층은 이양후 120일 우분퇴비 2배 연용처리구와 우분퇴비 4배+2배 처리구에서 각각 0.263mg L^{-1} , 0.187mg L^{-1} 로 표준시비(0.042mg L^{-1})와 우분퇴비 1배 연용처리구(0.095mg L^{-1}) 보다 약 2~3배 이상 검출되었다.
- 사. 벼 성숙기 생육은 우분퇴비 시용량이 많을수록 간장은 길어지고, 수수는 증가하나 수당립수와 등숙비율은 감소하였고, 우분퇴비를 4배 시용하거나 2배 이상 2년 연용처리시에도 벼 도복이 발생하고 잎집무늬마름병과 흑명나방 피해가 발생하였다.
- 아. 우분퇴비 시용량이 많아질수록 쌀수량은 증가하였으나 백도는 감소하였고 백미 피해립과 단백질 함량이 증가하였음

5. 인용문헌

- 국립농업과학원. 2010a. 토양 및 식물체 분석법. 농촌진흥청.
- 국립농업과학원. 2010b. 작물별 비료사용처방서. 농촌진흥청.
- 국립식량과학원. 2016. 완결과제 최종보고서. 유기물 비료 장기 투입에 따른 토양특성 변화 연구. 농촌진흥청.
- 기상청. 2020. 한국 기후변화 평가보고서 2020: 기후변화 과학적 근거. ISBN 978-89-954715-8-6.
- 남재작. 2020. 국내IP 환경동향보고. 가축분뇨의 친환경적 처리를 위한 경축순환농업 추진 동향. 환경부 KEITI 한국환경산업기술원.
- 농촌진흥청. 2002. 가축분뇨의 활용 지침서(액비 중심).

- 류종원. 2014. 돈분액비의 시용수준이 벼 생육과 품질 및 토양에 미치는 영향. 한국 유기농업학회지. 22(4):667-682.
- 박중수, 이원우, 주영철, 김영호. 2002. 벼 주요품종의 질소시비수준에 따른 도복저항성 정도. 한국작물학회지. 47(3):226-235.
- 박진도. 2019. 지역자원기반 경축순환농업 활성화 방안. 대통령직속 농어업·농어촌특별위원회. 발간번호 12-1790242-000008-01.
- 양창휴, 김병수, 류철현, 박우균, 유영석, 김재덕, 정광용. 2007. 하해혼성 평야지 논토양의 부산물퇴비 시용효과. 한국토양비료학회지. 40(3):181-188.
- 임준택, 이홍재, 조광석, 송동석. 1992. 벼 도복에 관여하는 형질 분석. 한국작물학회지. 37(1):78-85.
- 정응기, 김기중, 천아름, 이춘기, 김선림, Darshan S. Brar, 손종록. 2006. 등숙기 도복시기 및 정도에 따른 쌀 품질 특성. 한국작물학회지 51(5):440-444
- Miao, Y., B. A. Stewart, and F. Zhang. 2010. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review. Agron. Sustain. Dev. 31(2):397-414.
- Stumborg, C.M., J.J. Schoenau, and P. Qian. 2005. Phosphorus loading and environmental analysis in manured soils. Proceedings of Soil and Crops 2005. University of Saskatchewan Extension Press, Saskatoon, Sk., On CD.
- Takahashi, S., Uenosono, S., Ono, S. 2003. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions. Plant Soil. 251(2):291-301.

6. 연구결과 활용제목

- 경축순환농업 추진시 우분퇴비 적정살포 준수('24 정책제안)
- 벼 재배토양 우분퇴비 연용에 따른 미질특성('24 영농활용)

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도	
						23	24
우분퇴비	책임자	환경농업연구과	농업연구관	소호섭	세부과제총괄	○	○
시용량에 따른	공동연구자	〃	농업연구사	정재원	성적검토	○	○
벼 생육 및	〃	〃	〃	주옥정	자료정리	○	○
미질특성 구명	〃	〃	〃	안희정	자료정리	○	○
	〃	〃	〃	이정혜	자료정리	○	○
	〃	〃	농업연구관	박중수	연구자문	○	○